

Modelo Adaptativo de Partilha de Largura de Banda em Cenário de Auto-estrada**Gonçalo Jacinto***Universidade de Évora, Departamento de Matemática e CIMA-UE***António Pacheco***Instituto Superior Técnico, Departamento de Matemática e CEMAT***Nelson Antunes***Universidade do Algarve, Departamento de Matemática e CEMAT*

Resumo: As redes móveis sem fios multimédia são vistas hoje em dia como um dos factores chave para o desenvolvimento da infra-estrutura de comunicação global. Neste trabalho é proposto um modelo de previsão e de empréstimo de largura de banda entre células de forma a manter a qualidade de serviço das chamadas durante os períodos de congestão. É generalizado o modelo proposto por Antunes, Pacheco e Rocha (2000) para um cenário de auto-estrada escolhendo para processo de chegadas de móveis um processo de Poisson não homogéneo. Prova-se que as distribuições espaciais do número de móveis por tipo de chamada num instante fixo são processos de Poisson não homogéneos independentes. Com base neste resultado são obtidas estimativas da capacidade requerida e da probabilidade de bloqueio em cada célula, para implementação da estratégia de empréstimo. Para validar os resultados analíticos e aferir o desempenho da estratégia de empréstimo são apresentados resultados de simulação.

Palavras-chave: Controlo de rede, mobilidade, modelação de tráfego, processo de Poisson não homogéneo, redes sem fios, teletráfego.

Abstract: Mobile broadband wireless networks are seen today as one of the key factors for the development of the global communication infrastructure. In this paper, we propose a model to borrow and predict the bandwidth in cells, aiming at maintaining the quality service of calls during congestion periods. The model proposed by Antunes, Pacheco and Rocha (2000) for the highway scenario is generalized by choosing for the arrival process an nonhomogeneous Poisson process. We show that the spatial distributions of the number of mobiles per traffic state in a fixed instant are independent nonhomogeneous Poisson processes. Based on this result, we obtain the estimation of the required capacity in a cell, which is used in the implementation of the borrowing strategy. To evaluate the performance of the borrowing strategy, simulation results are presented.

Keywords: Mobility, network control, nonhomogeneous Poisson process, teletraffic, traffic modelling, wireless networks.

1 Introdução

A futura geração de redes de telecomunicações móveis deverá suportar uma variedade de aplicações (voz, dados, vídeo), com diversas necessidades de largura de banda. Estas redes podem servir diversos tipos de subscritores com necessidades específicas e diferentes exigências de qualidade de serviço [2].

As redes sem fios permitem aos subscritores comunicarem enquanto se encontram em movimento. Estas redes encontram-se tipicamente organizadas em regiões geográficas denominadas *células*. Cada célula tem atribuída uma *estação base*, que é responsável por fornecer a ligação como os subscritores. Se durante a duração da chamada um móvel se move de uma célula para outra, a chamada terá que ser permutada entre as estações base atribuídas a ambas as células. Esta acção é chamada de *handoff*.

A partilha de largura de banda entre células durante os períodos de congestão, permite que células que não estejam congestionadas emprestem largura de banda às células vizinhas, maximizando a utilização da largura de banda disponível e consequente redução das probabilidades de bloqueio em cada célula.

Das estratégias de empréstimo propostas, destacam-se Das, Sen e Jayaram [4], Lindsay-Stewart *et al.* [6], Ramanathan *et al.* [8] e Ule e Boucherie [9]. No entanto, estes modelos foram direccionados para redes de segunda geração e consideram a largura de banda dividida em canais, necessitando cada chamada de um canal para ser servida. Desta forma, estes modelos não incorporam as correntes exigências de teletráfego.

Neste artigo é proposto um modelo de previsão e partilha de largura de banda entre células de forma a manter a qualidade de serviço das chamadas durante períodos de congestão. Para isso, generaliza-se o modelo proposto por Antunes, Pacheco e Rocha [3] para um cenário de auto-estrada. Nomeadamente, considera-se um processo de Poisson não homogéneo para descrever o processo de chegadas de móveis à auto-estrada, o que permite incorporar períodos de intensidade de tráfego variável ao longo do tempo. Com base no modelo, são obtidos a distribuição espacial do número de móveis condicional ao estado de teletráfego e à posição do móvel e derivadas estimativas da capacidade requerida numa célula. Estes resultados são, por sua vez, utilizados no desenvolvimento da estratégia de empréstimo.

Este trabalho encontra-se estruturado da seguinte forma. Na Secção 2 apresentam-se as hipóteses do modelo de mobilidade e de teletráfego. Na Secção 3 são derivadas medidas de desempenho do estado da rede. Na Secção 4 descreve-se o modelo de partilha de largura de banda e a estratégia de empréstimo. Na Secção 5 são apresentados os resultados de simulação para se aferir o desempenho da estratégia de empréstimo. Finalmente, na Secção 6 tecem-se algumas conclusões.

2 Modelo de mobilidade e teletráfego

Considera-se um troço de auto-estrada com sentido único dividida em segmentos, onde cada segmento corresponde a uma célula e cujo comprimento total é de L (Km). A célula i ($1 \leq i \leq m$) compreende o intervalo $[l_{i-1}, l_i]$ da auto-estrada, com $0 = l_0 < l_1 < \dots < l_m = L$, cuja única entrada se situa na célula 1, nos $L_0 = 0$ (Km) e a única saída na célula m , nos $l_m = L$ (Km). Considera-se também que o tráfego se desloca num único sentido, da esquerda para a direita.

Seja $\{N(t), t \geq 0\}$ o processo (de contagem) de chegadas de móveis à auto-estrada, o qual se considera ser um processo de Poisson não homogêneo de taxa $\lambda(t)$. Assume-se que os móveis entram na auto-estrada com uma velocidade constante e que não existe perda de tempo quando um móvel ultrapassa outro. Seja V_r , a variável aleatória contínua com distribuição conhecida que representa a velocidade do móvel r , tal que

$$\{V_r, r \geq 1\} \stackrel{iid}{\sim} V \quad (1)$$

e denota-se por $F(f)$ a função distribuição cumulativa (função densidade de probabilidade) de V . Assume-se que $E[V^{-1}]$ é finito.

O processo de teletráfego do móvel r é definido por $(C_r(t), B_r(t))$, representando o estado de chamada e a capacidade requerida pela chamada do móvel t unidades de tempo após ter chegado à auto-estrada, e assume-se que

$$\{\{C_r(t), B_r(t), t \geq 0\}, r \geq 1\} \stackrel{iid}{\sim} \{(C(t), B(t)), t \geq 0\} \quad (2)$$

onde $\{(C(t), B(t)), t \geq 0\}$ é um processo de fluido Markov modulado. Isto é, o estado de chamada de um móvel na auto-estrada é governado por uma cadeia de Markov contínua irredutível, $\{C(t), t \geq 0\}$, com espaço de estados $A = \{0, 1, 2, \dots, n\}$, onde 0 representa o estado inactivo (sem chamada) e $\{1, 2, \dots, n\}$ os estados activos associados a n classes de tráfego, que modela a taxa à qual o fluido é gerado. O processo de fluido tem taxa $B(t) = b_{C(t)}$, onde b_j é a capacidade requerida por um móvel no estado j e $b_0 = 0$. Seja, para $t \geq 0$,

$$q_j(t) = P(C(t) = j), \quad q_{jk}(t) = P(C(t) = k | C(0) = j), \quad j, k \in A. \quad (3)$$

Finalmente, assume-se que o estado de chamada de um móvel e a sua velocidade são independentes

$$\{\{C_r(t), t \geq 0\}, r \geq 1\} \perp \{V_r, r \geq 1\}. \quad (4)$$

3 Estimação da capacidade requerida numa célula

Os resultados apresentados em [3] podem ser facilmente estendidos ao caso não homogêneo por recurso a resultados bem conhecidos sobre transformações de processos de Poisson não homogêneos, apresentados, e.g., em [1,5]. Deste modo,

4 Jacinto, Pacheco e Antunes/Modelo partilha de largura de banda

por restrições de espaço, são omitidas as demonstrações dos resultados enunciados na secção.

Para $t \geq 0$ e $1 \leq i \leq m$, seja $Y_i^j(t)$ o número de móveis na célula i , no instante t , com estado de chamada j . Então, as variáveis aleatórias $Y_i^j(t)$, $1 \leq i \leq m$, $j \in A$, são independentes e

$$Y_i^j(t) \sim \text{Poisson} \left(\int_0^t \int_{\frac{l_{i-1}}{x}}^{\frac{l_i}{x}} \lambda(s) f(v) q_j(t-s) ds dv \right). \quad (5)$$

Este facto implica, em particular, que o número de móveis que no instante t se encontram na célula i em estados de chamada activos e no estado inactivo sejam independentes e possuam distribuições de Poisson.

Para $t \geq 0$ e $j \in A$, seja $H_i^j(t)$ o número de móveis que saem da célula $i-1$ para a célula i da auto-estrada durante o intervalo $(0, t]$, com estado de chamada j . Então, para $1 \leq i \leq m$, os processos estocásticos $\{H_i^j(t), t \geq 0\}$, $j \in A$, são processos de Poisson não homogêneos independentes com médias

$$E[H_i^j(t)] = \int_0^t \int_{\frac{l_{i-1}}{t-s}}^{\frac{l_i}{t-s}} \lambda(s) f(v) q_j(t-s) dv ds. \quad (6)$$

A capacidade requerida em cada célula e em cada instante tem um papel fundamental na implementação do modelo adaptativo de partilha de largura de banda. Para $1 \leq i \leq m$, a capacidade requerida na célula i no instante t é

$$C_i^R(t) = \sum_{k=1}^n b_k Y_i^k(t). \quad (7)$$

Por sua vez, a estimativa da capacidade requerida pela célula i num instante futuro $t+h$ é representada por $\hat{C}_i^R(t+h)$. Para a respectiva caracterização é conveniente definir $Y_t^j(x)$ como sendo o número de móveis que no instante t se encontram no segmento $(0, x]$ da auto-estrada com estado chamada j , para $t \geq 0$, $0 \leq x \leq L$ e $0 \leq j \leq n$.

Pode concluir-se que, para $t \geq 0$ fixo, $\{Y_t^j(x), 0 \leq x \leq L\}$, $0 \leq j \leq n$, são processos de Poisson não homogêneos independentes, tais que

$$E[Y_t^j(x)] = \int_0^t \int_0^{\frac{x}{t-s}} f(v) q_j(t-s) \lambda(s) dv ds. \quad (8)$$

Como, para cada instante t , as variáveis aleatórias $Y_t^j(x)$, $0 \leq x \leq L$ e $0 \leq j \leq n$, são independentes, a distribuição espacial do número de móveis que no instante t se encontram na auto-estrada, $\{Y_t(x), 0 \leq x \leq L\}$, também é um processo de Poisson não homogêneo, com média

$$E[Y_t(x)] = \int_0^t \int_0^{\frac{x}{t-s}} f(v) \lambda(s) dv ds. \quad (9)$$

No instante t , a densidade espacial do número de móveis no intervalo $(0, x]$ é dada por

$$Q_t(x) = \frac{\partial E[Y_t(x)]}{\partial x} = \int_0^t \frac{f\left(\frac{x}{t-s}\right) \lambda(s)}{t-s} ds. \quad (10)$$

Como em cada instante se conhece o número de móveis em cada célula, pode-se normalizar a densidade espacial com o número de móveis na célula i . Assim, $Q_t^i(x)$ representa a densidade do número de móveis no intervalo $[l_{i-1}, l_i)$ no instante t , normalizada pelo número de móveis na célula i , ou seja,

$$Q_t^i(x) = \frac{Q_t(x)}{\int_{l_{i-1}}^{l_i} Q_t(y) dy}. \quad (11)$$

Assuma-se, no que se segue, que os móveis entram na auto-estrada em regime estacionário de teletráfego, ou seja, $q_j(0) = q_j$, para $0 \leq j \leq n$, o que implica que $q_j(s) = q_j$, para todo o $s \geq 0$. Neste caso, a densidade espacial normalizada $Q_t^i(x)$ é igual à densidade espacial normalizada do número de móveis na célula i com estado de chamada j , para $0 \leq j \leq n$, facto esse a que vamos recorrer já de seguida.

Considere-se que se encontram n_i móveis na célula i , dos quais n_i^0 estão inactivos e n_i^k estão activos no estado k , $1 \leq k \leq n$, tal que $n_i = \sum_{k=0}^n n_i^k$. Então, $S_i(t) = (n_i^k, 0 \leq k \leq n)$ representa o estado da célula i no instante t e $S(t) = (S_1(t), \dots, S_m(t))$ o estado (global) da rede no instante t .

Seja $A_i^{kj}(t, h)$ o evento correspondente a um móvel escolhido ao acaso entre os que no instante t se encontram na célula i com estado chamada k continuar, após h unidades de tempo, na célula i com estado de chamada activo j . Condicionando na densidade espacial normalizada do número de móveis na célula i no instante t , conclui-se que

$$P(A_i^{kj}(t, h)) = \int_{l_{i-1}}^{l_i} Q_t^i(x) \int_0^{\frac{l_i-x}{h}} q_{kj}(h) f(v) dv dx, \quad k \in A. \quad (12)$$

O valor esperado e variância de $B_i^k(t+h|t)$, a capacidade ocupada na célula i no instante $t+h$ por um móvel escolhido aleatoriamente entre os que no instante t se encontram na célula i com estado de chamada k , são, respectivamente:

$$E[B_i^k(t+h|t)] = \sum_{j \in A} P(A_i^{kj}(t, h)) b_j \quad (13)$$

$$\text{Var}[B_i^k(t+h|t)] = \sum_{j \in A} P(A_i^{kj}(t, h)) b_j^2 - (E[B_i^k(t+h|t)])^2. \quad (14)$$

Seja $C_i^M(t+h)$ a capacidade ocupada no instante $t+h$ pelos móveis que se mantêm na célula i durante o intervalo de tempo $[t, t+h]$. Como as unidades

6 Jacinto, Pacheco e Antunes/Modelo partilha de largura de banda

móveis se comportam independentemente, o valor esperado e a variância de $C_i^M(t+h)$, condicionando no estado da célula i são, respectivamente,

$$E[C_i^M(t+h)|S_i(t)] = \sum_{k=0}^n E[B_i^k(t+h|t)]n_i^k \quad (15)$$

$$\text{Var}[C_i^M(t+h)|S_i(t)] = \sum_{k=0}^n \text{Var}[B_i^k(t+h|t)]n_i^k. \quad (16)$$

De forma análoga ao efectuado em (12)-(16), condicionando no estado da rede no instante t , podemos obter o valor esperado e a variância de $C_i^H(t+h)$, a capacidade requerida na célula i pelos móveis que efectuam handoff para essa célula no intervalo $(t, t+h]$, obtendo-se:

$$E[C_i^R(t+h)|S(t)] = E[C_i^M(t+h)|S_i(t)] + E[C_i^H(t+h)|S(t)] \quad (17)$$

$$\text{Var}[C_i^R(t+h)|S(t)] = \text{Var}[C_i^M(t+h)|S_i(t)] + \text{Var}[C_i^H(t+h)|S(t)]. \quad (18)$$

Quando o número de móveis nas células i e $i-1$ se torna grande, a capacidade ocupada na célula i decorridas h unidades de tempo pode ser aproximada pelo teorema do limite central de Lindeberg para somas identicamente distribuídas, situação essa em que

$$\frac{(C_i^R(t+h)|S(t)) - E[C_i^R(t+h)|S(t)]}{\sqrt{\text{Var}[C_i^R(t+h)|S(t)]}} \underset{a}{\approx} N(0, 1). \quad (19)$$

4 Algoritmo de partilha de largura de banda

Supõe-se, para evitar interferências de ligações rádio entre as estações móveis e as células, que apenas se podem efectuar empréstimos de largura de banda entre células vizinhas e, em cada instante, no máximo duas células consecutivas podem realizar empréstimos. Assume-se ainda que a direcção do empréstimo é à esquerda, na direcção oposta ao sentido de tráfego.

Como a estratégia de empréstimo é implementada em cada período de h unidades de tempo, considera-se, no que se segue, que o período k , $k \in \mathbb{N}_0$ representa o instante $t = kh$. Desta forma, em vez de nos referirmos ao instante t , passamos a considerar o período k . Uma variável definida no período k mantém sempre o mesmo valor nesse período, ou seja, no intervalo de tempo $[kh, (k+1)h)$.

A criação do cluster de células é a primeira etapa no modelo de partilha de largura de banda. Um cluster é constituído por três células, a última célula do troço da auto-estrada que se encontra bloqueada, mais as duas células que se encontram à esquerda desta. Apenas as células abrangidas pelo cluster podem efectuar empréstimos e, em cada instante, apenas poderá existir um cluster num troço da auto-estrada.

Cada célula tem atribuída uma certa largura de banda inicial fixa C_i . Uma célula diz-se *bloqueada* se a capacidade requerida num determinado instante ou a capacidade requerida estimada após h unidades de tempo exceder a capacidade inicial atribuída à célula i , ou seja, se

$$\widehat{C}_i(t) = \max \left\{ \widehat{C}_i^R(t+h), C_i^R(t) \right\} > C_i; \quad (20)$$

caso contrário, a célula i diz-se *não bloqueada*. A actualização do cluster, que no período k é designado por U_k , de período para período pode ser descrita por:

(A) Não existe cluster no período $k-1$, $U_{k-1} = \emptyset$, então:

- Se nenhuma das células se encontrar bloqueada no período k não haverá qualquer cluster neste período, $U_k = \emptyset$.
- Caso contrário, o cluster no período k será $U_k = \{j-2, j-1, j\}$ com j denotando o índice máximo das células que se encontram bloqueadas neste período.

(B) Se existe cluster no período $k-1$, $U_{k-1} = \{i-2, i-1, i\}$, então:

- Se as células i e $i+1$ não se encontrarem bloqueadas, $U_k = \{j-2, j-1, j\}$ com j denotando o índice máximo das células que se encontrem bloqueadas no período k .
- Caso contrário, o cluster no período k será $U_k = \{j-2, j-1, j\}$ com j denotando o índice máximo das células i e $i+1$ que se encontrem bloqueadas.

Seja $\{p_{i,i-1}(k), k \in \mathbb{N}_0\}$ o processo estocástico que define o pedido de empréstimo primário da célula i à célula $i-1$ e $\{d_{i+1,i}(k), k \in \mathbb{N}_0\}$ o processo que define a devolução primária da célula $i+1$ à célula i em cada período k . A integração destes pedidos num pedido único origina os pedidos e devoluções efectivos e são dados pelos processos $\{P_{i,i-1}(k), k \in \mathbb{N}_0\}$ e $\{D_{i+1,i}(k), k \in \mathbb{N}_0\}$, respectivamente.

O processo estocástico que descreve a capacidade de serviço da célula i é $\{C_i^S(k), k \in \mathbb{N}_0\}$, onde $C_i^S(k)$ é a largura de banda que no período k a célula i dispõe para servir os móveis. Num dado período k , a capacidade de serviço é facilmente representada por

$$C_i^S(k) = \begin{cases} C_i & \text{se } i \notin U_k \\ C_i + L_{i,i-1}(k) - L_{i+1,i}(k) & \text{se } i \in U_k \end{cases} \quad (21)$$

onde $L_{i,i-1}(k)$ representa a largura de banda total que a célula $i-1$ tem emprestada à célula i no período k , dada por

$$L_{i,i-1}(k) = L_{i,i-1}(k-1) + P_{i,i-1}(k) - D_{i+1,i}(k). \quad (22)$$

8 Jacinto, Pacheco e Antunes/Modelo partilha de largura de banda

Para implementação da estratégia de empréstimo é necessário a passagem por duas etapas distintas, cada uma delas exigindo um reduzido intervalo de tempo para ser concluída.

Na primeira etapa a unidade de controlo da rede requisita a cada célula informações acerca do número de móveis em cada estado de chamada e, com base nesta informação, estima a capacidade requerida em cada célula para o próximo período, construindo o cluster (se necessário);

Na segunda etapa é implementado o algoritmo de empréstimo, aceitando-se ou rejeitando-se os pedidos de empréstimo consoante as disponibilidades de cada célula. No final desta etapa, são actualizadas as informações do estado da rede e, no período $k + 1$, retorna-se à primeira etapa.

Após a apresentação da metodologia a ser aplicada, definamos concretamente o modelo. No que se segue, $x^+ = \max\{0, x\}$, para $x \in \mathbb{R}$.

Definição 1 (Pedido primário) *A célula i efectua um pedido de empréstimo primário à célula $i - 1$ no período k , $k \in \mathbb{N}_0$, se e só se*

$$\{i, i - 1\} \in U_k \text{ e } \widehat{C}_i(k) > C_i^S(k). \quad (23)$$

Se estas condições se verificarem, a capacidade a pedir à célula $i - 1$ será

$$p_{i,i-1}(k) = \left[\widehat{C}_i(k) - C_i^S(k) \right]^+. \quad (24)$$

O pedido efectuado é o estritamente necessário para a célula i colmatar o défice de largura de banda no período. Quando uma célula pertencente ao cluster não está bloqueada pode emprestar largura de banda. A capacidade máxima que a célula i poderá disponibilizar para empréstimo no período k é dada por

$$C_j^D(k) = \left[C_j^S - \widehat{C}_j(k) \right]^+. \quad (25)$$

Definição 2 (Devolução primária) *A célula $i - 1$ efectua uma devolução primária à célula $i - 2$ no período k , $k \in \mathbb{N}_0$, se e só se*

$$\{i - 1, i - 2\} \in U_{k-1} \text{ e } C_{i-1}^D(k) > 0. \quad (26)$$

Se estas condições se verificarem, a largura de banda devolvida, que pode ser total ou parcial, é dada por

$$d_{i-1,i-2}(k) = \min \{ L_{i-1,i-2}(k - 1); C_{i-1}^D(k) \}. \quad (27)$$

Após a definição dos pedidos e devoluções de empréstimo primários, é necessário descrever como estes são agrupados nos pedidos e devoluções efectivos e, influenciada pela evolução do cluster, como a largura de banda emprestada é administrada.

Algoritmo (empréstimo de largura de banda)

(A) Novo cluster na célula i no período k , com $U_k = \{i - 2, i - 1, i\}$:

$$P_{i,i-1}(k) = p_{i,i-1}(k)$$

$$P_{i-1,i-2}(k) = \left[p_{i,i-1}(k) + p_{i-1,i-2}(k) - \left[C_{i-1}^S - \widehat{C}_{i-1}(k) \right]^+ \right]^+.$$

(B) Já existe cluster na célula i no período $k - 1$:

Caso 1: Avanço do cluster para a célula (seguinte) $U_k = \{i - 1, i, i + 1\}$:

1. A célula $i - 1$ devolve toda a largura de banda à célula $i - 2$,

$$D_{i-1,i-2}(k) = L_{i-1,i-2}(k).$$

2. A célula $i + 1$ efectua um pedido à célula i ,

$$P_{i+1,i}(k) = \left[\widehat{C}_{i+1}(k) - C_{i+1}^S \right]^+.$$

3. A célula i avalia a largura de banda que necessita (além da que já tem por empréstimo da célula $i - 1$) e conjuga com o pedido proveniente da célula $i + 1$:

- a) Se $C_i^D(k) = 0$ (a célula i necessita de largura de banda),

$$P_{i,i-1}(k) = p_{i,i-1}(k) + p_{i+1,i}(k).$$

- b) Se $0 < C_i^D(k) < p_{i+1,i}(k)$ (a célula i não consegue satisfazer por si só o pedido da célula $i + 1$),

$$P_{i,i-1}(k) = \left[p_{i+1,i}(k) - d_{i,i-1}(k) + \left[C_i - \widehat{C}_i(k) \right]^+ \right]^+.$$

- c) Se $C_i^D(k) \geq p_{i+1,i}(k)$ (a célula i consegue satisfazer por si só o pedido da célula $i + 1$),

$$D_{i,i-1}(k) = \left[d_{i,i-1}(k) - \left[p_{i+1,i}(k) - \left[C_i - \widehat{C}_i(k) \right]^+ \right]^+ \right]^+.$$

Caso 2: Conservação do cluster na célula $U_k = \{i - 2, i - 1, i\}$:

1. Se $C_i^D(k) = 0$ e $C_{i-1}^D(k) = 0$ (ambas as células necessitam de mais largura de banda):

$$P_{i,i-1}(k) = p_{i,i-1}(k)$$

$$P_{i-1,i-2}(k) = p_{i,i-1}(k) + p_{i-1,i-2}(k).$$

10 Jacinto, Pacheco e Antunes/Modelo partilha de largura de banda

2. Se $C_i^D(k) = 0$ e $C_{i-1}^D(k) > 0$ (só a célula i necessita de largura de banda):

$$P_{i,i-1}(k) = p_{i,i-1}(k)$$

$$D_{i-1,i-2}(k) = \min \left\{ L_{i-1,i-2}(k-1); [\Delta]^+ \right\}.$$

$$\text{com } \Delta = \left[d_{i-1,i-2}(k) + [C_{i-1} - \widehat{C}_{i-1}(k)]^+ \right]^+ - p_{i,i-1}(k).$$

3. Se $C_i^D(k) > 0$ e $C_{i-1}^D(k) = 0$ (só a célula $i-1$ necessita de largura de banda) a célula i devolve $D_{i,i-1}(k) = d_{i,i-1}(k)$ e a célula $i-1$ pede ou devolve:

$$P_{i-1,i-2}(k) = [p_{i-1,i-2}(k) - d_{i,i-1}(k)]^+$$

$$D_{i-1,i-2}(k) = \min \left\{ L_{i-1,i-2}(k-1); [d_{i,i-1}(k) - p_{i-1,i-2}(k)]^+ \right\}.$$

4. Se $C_i^D(k) > 0$ e $C_{i-1}^D(k) > 0$ (ambas as células libertam largura de banda):

$$D_{i,i-1}(k) = d_{i,i-1}(k)$$

$$D_{i-1,i-2}(k) = \min \left\{ L_{i-1,i-2}(k-1), d_{i,i-1}(k) + d_{i-1,i-2}(k) \right\}.$$

Caso 3: Extinção do cluster:

Neste caso, todas as células do cluster $U_k = \{i-2, i-1, i\}$ devolvem toda a largura de banda que possuem por empréstimo:

$$D_{i,i-1}(k) = d_{i,i-1}(k) = L_{i,i-1}(k-1)$$

$$D_{i-1,i-2}(k) = d_{i-1,i-2}(k) = L_{i-1,i-2}(k-1).$$

Após a implementação do algoritmo de empréstimo, os pedidos são direccionados para as células respectivas. Se um pedido não puder ser totalmente satisfeito, é emprestada apenas a largura de banda possível, sendo o pedido satisfeito parcialmente.

5 Resultados de simulação

Nesta secção ir-se-á aferir o desempenho do modelo de partilha de largura de banda por intermédio de simulação utilizando a linguagem PARSEC [7]. Na análise estatística dos resultados, para estimação das probabilidades estacionárias, foi adoptado o método de replicação/anulação para médias.

Considere-se que o processo de entradas é Poisson não homogéneo, com taxa máxima de entradas de 60 móveis por minuto, representando tráfico intenso [1]. A taxa de entradas, em segundos, é dada por

$$\lambda(t) = \begin{cases} \frac{\cos(\frac{80}{43200}\pi t + \pi) + 3}{4} & 7560 \leq [t, 16200] \leq 8640 \\ 0.5 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

onde $[t, 16200]$ representa o resto da divisão inteira de t por 16200. Esta taxa é periódica com período de 4.5 horas, com um pico de tráfego, atingindo a taxa máxima de entradas de 60 móveis por minuto, com 18 minutos de duração. Os pressupostos considerados na simulação foram:

- Um troço de auto-estrada seccionada em 12 células, todas com $10Km$ e com 1050 Kbps de capacidade.
- A velocidade dos móveis (Km/h) segue uma distribuição triangular simétrica com média 100 e amplitude 40.
- Considera-se que o processo de teletráfego possui 1 estado activo, representando tráfego em tempo real do tipo contínuo, como e.g., chamadas de voz. Considera-se que a distribuição de cada chamada é exponencial com média 100 segundos e a largura de banda necessária para servir uma chamada deste tipo é de 16 Kbps. O tempo de permanência no estado inactivo é exponencialmente distribuído com média 300 segundos. Considera-se ainda que na entrada da auto estrada 25% das chamadas surgem no estado activo e 75% no estado inactivo.

Considerou-se h , a duração de um período entre estimativas sucessivas, igual a 180 segundos. Para aferir a qualidade do modelo de partilha de largura de banda compararam-se os modelos sem a estratégia de empréstimo activa e com a estratégia de empréstimo activa, onde são permitidos empréstimos parciais. Na Figura 1, pode-se comparar a capacidade estimada e a capacidade realmente observada, na presença de um período de congestão. Podemos verificar que, na presença de um período de congestão, o modelo efectua uma correcta estimativa do estado da rede em instantes futuros.

Na Figura 2, apresenta-se a probabilidade de bloqueio de uma chamada (nova ou handoff) nas diferentes células com estratégia de empréstimo activa (EE activa) e inactiva (EE inactiva).

Pode-se concluir que o modelo com a estratégia de empréstimo activa apresenta o melhor desempenho. Obtêm-se ganhos globais na rede na ordem dos 18% e as células do início da auto-estrada apresentam ganhos na ordem dos 30%. Observa-se além disso um decréscimo das probabilidades de bloqueio à medida que se avança ao longo das células. Este efeito deve-se ao movimento dos móveis ao longo da auto-estrada e às diferentes velocidades, que provocam uma diminuição da intensidade do pico de tráfego à medida que se movimentam, e, conseqüentemente, uma diminuição da intensidade de bloqueios.

6 Conclusões

Neste trabalho apresentou-se um modelo de partilha de largura de banda para manter a qualidade de serviço das chamadas durante os períodos de congestão da rede. Este modelo baseia-se num procedimento simples para estimar a largura de banda requerida em cada célula em instantes futuros e tira partido do facto deste

12 Jacinto, Pacheco e Antunes/Modelo partilha de largura de banda

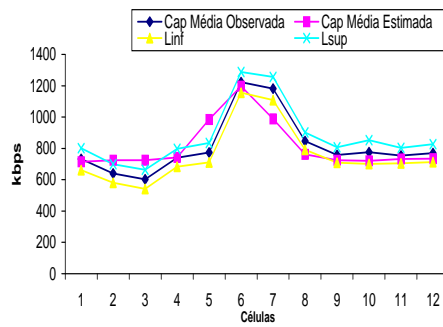


Figura 1: Estimativas da capacidade requerida e da capacidade observada e seus limites de confiança a 95%.

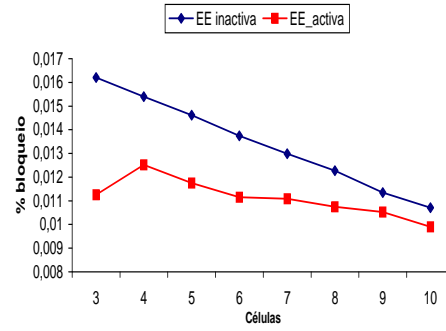


Figura 2: Probabilidade de bloqueio (nova chamada e handoff) por cada célula

procedimento produzir estimativas bastante precisas. Na presença de períodos de congestão, o modelo com a estratégia de empréstimo activa é extremamente eficaz na previsão e no controlo da rede, chegando a atingir reduções nos bloqueios superiores a 30%.

Agradecimentos: Este trabalho foi elaborado com o apoio parcial da Fundação para a Ciência e Tecnologia e do projecto POSI/42069/CPS/-2001.

Referências

- [1] Antunes, N. (2001). *Modelling and Analysis of Wireless Networks*. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- [2] Antunes, N., Rocha, R., Pinto, P. e Pacheco, A. (1998). Impact of next-generation wireless networks requirements on teletraffic modelling. *Interoperable Communication Network*, Vol. 1(2-4), p.706-715.
- [3] Antunes, N., Pacheco, A. e Rocha, R. (2000). Traffic modelling for broadband wireless networks: The highway scenario. *Advances in Performance Analysis*, Vol. 3(2), p.109-136.
- [4] Das, S.K., Sen, S.K. e Jayaram, R. (1998). A dynamic load balancing scheme for channel assignment using selective borrowing in cellular mobile environment. *IEEE/ACM Conference on Mobile Computing and Networking*.
- [5] Kingman, J.F.C. (1993). *Poisson Processes*. Oxford University Press, NY.
- [6] Lindsay-Stewart, A., Lee, W.C.Y., Schulz, M.A., Xu, C. (2001). Incremental capacity gains for high blocking sites using dynamic channel sharing. *IEEE Transactions on Vehicular technology*, Vol. 50(1), p.1-11.
- [7] Meyer, R. (1998). *PARSEC User Manual*. UCLA Parallel Computing Laboratory.
- [8] Ramanathan, P., Sivalingam, K. M., Agrawal, P. e Kishore, S. (1999). Dynamic resource allocation schemes during handoff for mobile multimedia wireless networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 17(7), p.1270-1283.
- [9] Ule, A. e Boucherie, R. (2001). Adaptive dynamic channel borrowing in road-covering mobile networks, Memorandum No. 1589, Faculty of Mathematical Sciences, University of Twente.